



**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia Energia**

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E CARACTERIZAÇÃO
DE SECADOR DE BIOMASSA ROTATIVO
PROTÓTIPO.**

**Autora: Thaynara Késsia Espíndola Pereira
Orientador: Prof. Dr. Félix Martin Carbajal Gamarra**

**Brasília, DF
2019**





THAYNARA KÉSSIA ESPÍNDOLA PEREIRA

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E CARACTERIZAÇÃO DE SECADOR DE
BIOMASSA ROTATIVO PROTÓTIPO.**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Félix Martin Carbajal Gamarra

**Brasília, DF
2019**

Pereira, Thaynara Késsia Espíndola.

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E CARACTERIZAÇÃO DE SECADOR DE BIOMASSA ROTATIVO PROTÓTIPO./ Thaynara Késsia Espíndola Pereira.
Brasília: UnB, 2018. 68 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientação: Prof. Dr. Felix Martin Carbajal Gamarra.

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília – UnB -Faculdade UnB Gama -
FGA , 2019. Universidade de Brasília

1. Secagem de Grãos. 2. Fenômenos de Transferência. 3. Secador Rotatório. I. Prof. Dr. Felix Martin Carbajal Gamarra . II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E CARACTERIZAÇÃO DE SECADOR DE BIOMASSA ROTATIVO PROTÓTIPO.

CDU



EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E CARACTERIZAÇÃO DE SECADOR DE BIOMASSA ROTATIVO PROTÓTIPO.

Thaynara Késsia Espíndola Pereira


Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.



Prof. (Dr.): Felix Marin Carbajal Gamarra, UnB/ FGA
Orientador



Prof. (Dr.): Rodrigo Andres Miranda Cerda, UnB/ FGA
Membro Convidado 1



Prof.ª (Dra.): Sandra Maria Falcões Lima, UnB/ FGA
Membro Convidado 2

Brasília, DF
2019

Este trabalho é dedicado à meu pai, Valtemir Reginaldo Pereira, que em vida me proporcionou todo o suporte para que eu pudesse buscar meus sonhos e em memória me deu forças para não desistir de nenhum deles.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pelo sublime milagre da vida, à toda minha família em especial meus pais Maria Magda e Valtemir pela motivação, suporte e amor, à meu irmão Guilherme pelo apoio e auxílio nos momentos de dificuldade.

À meus amigos de jornada acadêmica e da vida por todo o companheiro em compartilhar as dificuldades, comemorar as alegrias e partilhar os sonhos.

Agradeço à meu orientador pelo suporte e incentivo acadêmico que me forneceu em diversas fases da minha graduação, em especial durante a elaboração deste trabalho.

A todos os professores, alunos e servidores da Universidade de Brasília que de alguma forma contribuíram com o meu processo de aprendizagem.

Aos professores convidados a compor a banca de avaliação por seu tempo dedicado a este trabalho e por suas valiosas sugestões.

Aos funcionários do Departamento de Biocombustíveis do Ministério de Minas e Energia por serem mentores tão generosos e por terem contribuído imensamente para meu crescimento.

RESUMO

A secagem é uma operação unitária muito importante e amplamente utilizada em diversos materiais de diferentes áreas, porém a interpretação dos fenômenos de transferência é complexa e muitas vezes os resultados, quando obtidos, não são publicados no meio acadêmico em geral. A extração da água superficial dos materiais via secagem requer elevado consumo de energia, portanto é necessária uma contínua interpretação da cinética do processo, afim de prolongar a vida de prateleira do material, de forma que não sejam gerados impactos financeiros no custo final do produto. A economia da Região Centro-Oeste tem como um dos seus principais pilares a agricultura com foco na cultura de grãos, sendo a secagem uma etapa primordial. Portanto, é importante o domínio da secagem, para projetar o desenho de secadores, assim como, interpretar a interação cultivos-condições de operação da Região. O secador rotativo é o mais recomendado para secagem de grãos, por possuir diversas vantagens, tais como: o tambor cilindro que se adapta à geometria dos grãos, ter um baixo custo de manutenção e utilizar velocidades baixas de giro em torno do próprio eixo. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo principal avaliar o funcionamento de um secador protótipo rotativo tipo cilindro horizontal para grãos de milho e café da Região Centro Oeste. O desenho e construção do secador foi realizado por integrantes do Grupo de Pesquisa Tecnologias Limpas, na Faculdade do Gama (FGA) da Universidade de Brasília (UnB). Para a avaliação do protótipo desenvolvido foi desenhado e montado um sistema integrado utilizando-se o microprocessador *Raspberry PI* e o sensor de umidade e temperatura DHT22. Este sistema foi acoplado ao protótipo para a leitura da emissão das variáveis como temperatura e umidade relativa, que posteriormente foram utilizados para a obtenção das demais propriedades psicométricas, tais como: temperatura de orvalho, temperatura de bulbo úmido, massa específica e entalpia. Também foi montado um código de programa em linguagem de programação *Python3*, que permite a visualização, armazenamento e leitura em gráficos destes dados. Adicionalmente, para interpretar os perfis da secagem experimental foi montada a carta psicométrica e avaliados os balanços globais de energia e massa para alguns casos ilustrativos. Os perfis obtidos indicam o decréscimo da umidade contida nos grãos em função do tempo da operação de secagem. Os resultados obtidos foram satisfatórios e foi evidenciado com o funcionamento do protótipo desenvolvido. Este trabalho também visa contribuir para os conhecimentos dos alunos de Graduação em Engenharia na interpretação do fenômeno da secagem por meio do protótipo desenvolvido, com aplicações em aulas experimentais das disciplinas de transferência de calor e dinâmica dos fluidos, além de ser um equipamento que pode ser utilizado como método de secagem adotado por pequenos e médios agricultores da Região Centro-Oeste.

Palavras-Chave: Secador Rotativo; Fenômenos de Transferência; Secagem de Grãos.

ABSTRACT

Drying is a very important unitary operation and widely used in several materials from different areas, but the interpretation of the transfer phenomena is complex and is often not published in the academic environment in general. Extraction of surface water from the materials through drying requires a high energy consumption, therefore a continuous interpretation of process kinetics is necessary, prolonging the shelf life of the material and not to generate financial impacts on the final cost of the product. The economy of the Central- West Region and of much of Brazil has as one of its main pillars agriculture focused on grain culture, with drying being a primordial stage. Therefore, the field of drying is fundamental to design the design of dryers, as well as to interpret the interaction between crops and operating conditions of the Region. The rotary dryer is best suited for grain drying because it has a number of advantages, such as the drum drum it uses, which adapts to grain geometry, has a low maintenance cost and uses low spinning speeds around the shaft itself. In this context, the main objective of this work is to evaluate the operation of a horizontal cylinder type rotating prototype drier for corn and coffee beans from the Central West Region. The design and construction of the dryer was carried out by members of the Clean Technology Research Group, at the Faculdade FGA, of the Univerisdade de Brasilia. For the evaluation of the developed prototype, an integrated system was designed and assembled using the Raspberry PI microprocessor and DHT22 temperature and humidity sensor. This system was coupled to the prototype to read the emission of variables such as temperature and relative humidity, which were later used to obtain the other psychometric properties, such as: dew temperature, wet bulb temperature, specific mass and enthalpy. It has also been putting together a program code in Python3 programming language, which allows the visualization, storage and reading in graphics of this data. Additionally, to interpret the profiles of the experimental drying the psychometric chart was set up, the global energy and mass balances for some illustrative cases. The obtained profiles indicate the decrease of the humidity contained in the grains as a function of the time of the drying operation. The results obtained were satisfactory and the operation of the developed prototype was evidenced. This work also aims to contribute to the knowledge of undergraduate students in Engineering in the interpretation of drying phenomena through the prototype developed as a tool and its use in experimental tests for small and medium farmers in the Midwes

Keywords: Drying, rotary dryer, transfer phenomena, grain drying.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Secador rotativo de fluxo concorrente.....	20
Figura 02 – Desenhos esquemáticos de protótipo de secador rotativo.....	21
Figura 03– Parte interna do tambor com suspensores.....	22
Figura 04 – Tambor com estruturas para promover a rotação do equipamento e local para a inserção de grãos.....	22
Figura 05 – Eixo fixo.....	23
Figura 06 – Estrutura de suporte.....	24
Figura 07 – Sistema de transmissão por corrente e coroa.....	25
Figura 08 – Esquemático de circuito de potência e dimmer instalado na estrutura.....	25
Figura 09 – Equipamento de fornecimento de ar acoplado a estrutura.....	26
Figura 10 – Protótipo de secador rotativo.....	26
Figura 11 – Carta psicométrica.....	30
Figura 12 – Gráfico de taxa de secagem vs tempo.....	31
Figura 13 – Esquema de transporte de massa em secador rotativo.....	37
Figura 14 –Café e milho utilizados nos ensaios.....	42
Figura 15 –Grãos de café e milho após pré-tratamento.....	43
Figura 16 –Secador rotativo protótipo.	43
Figura 17 –Comparação do protótipo antes e após ajustes construtivos.....	48
Figura 18 –Sistema de obtenção de dados utilizando <i>raspberrry</i> PI.....	49
Figura 19 –Validação de funcionamento do sensor no secador com teste à vazio.....	50
Figura 20 –Aferição da massa dos grãos antes dos ensaios.....	50
Figura 21 – Curvas de secagem de milho.	54
Figura 22 –Curvas de secagem de café	56
Figura 23 – Carta Psicométrica do secador rotativo protótipo	59
Figura 24–Script elaborado.....	60
Figura 25 –Resultado ilustrativo do funcionamento do script com armazenamento do dados e plotagem da curva de secagem em tempo real.....	61

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1 OBJETIVOS.....	16
1.1.1 Objetivos Gerais.....	16
1.1.2 Objetivos Específico.....	16
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	16
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1 CONCEITOS BÁSICOS DE SECAGEM.....	18
2.2 TIPOS DE SECADORES ARTIFICIAIS.....	18
2.2.1 Secador Rotativo.....	19
2.3 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO SECADOR ROTATIVO PROTÓTIPO.....	20
2.3.1 Construção do tambor rotativo.....	21
2.3.2 Construção do eixo fixo.....	23
2.3.3 Construção da estrutura de suporte.....	23
2.3.4 Seleção do motor.....	24
2.3.5 Sistema de transmissão.....	24
2.3.6 Instalação Circuito de Potência.....	25
2.3.7 Desenvolvimento do sistema de fornecimento de ar.....	26
2.4 PSICOMETRIA.....	27
2.4.1 Umidade.....	27
2.4.2 Umidade de saturação.....	27
2.4.3 Umidade relativa.....	28
2.4.4 Porcentagem de umidade.....	28
2.4.5 Calor específico de vapor de água.....	28
2.4.6 Ponto de orvalho.....	29
2.4.7 Temperatura de bulbo seco.....	29
2.4.8 Temperatura de bulbo úmido.....	29
2.4.9 Carta psicométrica.....	30
2.5 FENÔMENOS DE TRANSPORTE E AS ETAPAS DA SECAGEM.....	31
2.6 TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA APLICADOS A SECAGEM.....	32

2.6.1 Transferência de Calor.....	33
2.6.1.1 Transferência de Calor por Condução.....	33
2.6.1.2 Transferência de Calor por Convecção.....	34
2.6.1.3 Transferência de Calor por Radiação.....	35
2.6.2 Transferência de Massa.....	36
2.7 BALANÇOS DE MASSA E ENERGIA.....	37
2.7.1 Balanço de Massa.....	37
2.7.2 Balanço de Energia.....	39
3 METODOLOGIA.....	42
3.1 MATERIAIS.....	42
3.2 MÉTODOS.....	44
3.2.1 Condições de ensaio.....	44
3.2.2 Eficiência Energética.....	44
3.2.2.1 Balanço de Massa.....	44
3.2.2.1 Balanço de Energia.....	44
3.2.2.3 Transferência de Calor.....	45
3.2.3 Caracterização do Secador.....	46
3.2.3.1 Curvas de Secagem.....	46
3.2.3.1 Carta Psicométrica.....	46
3.2.3.3 Software.....	47
3.2.3.4 Manual do Usuário.....	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
4.1 AJUSTES CONSTRUTIVOS.....	48
4.1.1 Alterações no protótipo.....	48
4.1.2 Sistema de obtenção de dados.....	49
4.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	50
4.2.1 Balanço de Massa.....	50
4.2.2 Transferência de Calor.....	52
4.2.3 Balanço de Energia.....	53
4.3 CARACTERIZAÇÃO DO SECADOR.....	54
4.3.1 Curvas de Secagem.....	54
4.3.2 Carta Psicométrica.....	57
4.3.3 Software.....	60

4.3.4 Manual de Instruções ao Usuário.....	62
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	65
REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

A secagem consiste no processo que remove substâncias voláteis de um determinado produto e os objetivos de realizar este processo podem ser diversos, tais como: preservar propriedades, aumentar o tempo de conservação de alimentos sem a necessidade de refrigeração, entre outros. Normalmente a remoção das ditas substâncias voláteis (em sua maioria água) é realizada por um processo térmico vinculado a adição de calor, porém com os avanços tecnológicos, foram surgindo novas formas de realizar este processo, o que ocasionou no surgimento de diversas vertentes de construção de secadores (KEEY, 1972).

Dentre os mais diversos tipos de secadores artificiais existentes, destaca-se o secador rotativo, devido a seus baixos custos de produção e manutenção. Este secador é do tipo regime contínuo e pode operar com fluxo concorrente ou contracorrente, neste último a secagem é realizada por transferência de calor convectiva.

Os grãos produzidos na região Centro-Oeste são responsáveis por movimentação de boa parte da economia desta região e sabe-se a partir de Teixeira e Hespanhol (2006) que principalmente após a década de 1970 houveram grandes investimentos governamentais para promover a atividade agroindustrial da região Centro-Oeste, sendo assim, pode-se associar boa parte dos aspectos socioeconômicos da região à cultura de grãos.

A modernização da agricultura brasileira começou na década de 1950, com investimentos estatais para promover a mesma, porém foi apenas na década de 1970 que esta modernização chegou a região Centro-Oeste. Os investimentos que esta região recebeu possibilitaram que a mesma fosse inserida no mercado nacional, causando grandes impactos socioeconômicos na região (TEIXEIRA; HESPANHOL, 2006).

Esta modernização causou grandes impactos no sistema de produção desta região porém, o desenvolvimento da agricultura ocorreu de forma seletiva, ou seja, em concentrações de terra e apenas para alguns tipos de plantio. Além do fato desta modernização ter atingido apenas os grandes proprietários de terras, que consequentemente eram grandes produtores (TEIXEIRA; HESPANHOL, 2006).

Atualmente os números acerca da economia movida pela agroindústria no Centro- Oeste são bem promissores, em 2015 mesmo com o país passando por um período conturbado, o Produto Interno Bruto (PIB) desta região aumento 1,33% segundo o banco central, sendo este o maior crescimento entre todas as regiões do país, fato atribuído principalmente a agricultura e a pecuária, especialmente devido à cultura de soja que segundo estudos foi responsável por quadruplicar o PIB da região após sua inserção (BRASIL, 2016).

Na safra de 2014/2015 a região realizou a produção de 42% da safra de grãos do país, atingindo a marca de mais de 200 milhões de toneladas, já na safra de 2016/2017 produziu mais de 213 milhões de toneladas e as projeções são de contínuo crescimento, a cultura de grãos na região já atinge mais de 23,7 milhões de hectares (BRASIL, 2017).

Recentemente apurou-se que a região Centro-Oeste produz mais de 200 milhões de toneladas por safra, devido a este fato é necessário que a região invista em processos de tratamento destes grãos, como a secagem, que possibilita por meio da redução da umidade que o produto se torne adequado ao armazenamento ou transporte de acordo com as regras de segurança vigentes (BRASIL. MAPA, 2017).

Desta forma, verifica-se que é necessário desenvolver formas que possibilitem o aumento do valor agregado aos grãos produzidos nesta região então, justifica-se a iminente necessidade de desenvolvimento deste trabalho com base em 3 pilares: A escassa informação na literatura e pouca exploração científica do processo de secagem em grãos, além da grande importância dos grãos usados no âmbito socioeconômico da região do Centro- Oeste e pela possibilidade de incrementar o valor agregado aos grãos, por meio do processo de secagem, para que este processo seja acessível a pequenos e médios produtores da região, uma vez que após os testes aqui descritos serem realizados o protótipo pode se tornar um produto escalável com baixo custo de produção, descentralizando assim a secagem apenas da esfera industrial.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos Gerais

Objetiva-se caracterizar o funcionamento do secador rotativo protótipo por meio de fenômenos de transferência tais como massa e energia, correlacionando o desenho do equipamento com as variáveis, condições de operação e culturas a serem secas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Selecionar as culturas da Região Centro Oeste a ser testadas no secador protótipo;
- Avaliar o isolamento energético do secador protótipo;
- Elaborar a carta psicrométrica para o secador rotativo protótipo de acordo com suas condições de operação;
- Realizar testes e analisar a secagem de grãos via secador rotatório das culturas selecionadas;
- Realizar do equacionamento matemático do ponto de vista da transferência de calor do fenômeno de secagem no secador rotativo;
- Criar um software que permita a visualização dos dados da secagem com plotagem de gráficos em tempo real;
- Determinar a eficiência energética do protótipo de um secador rotatório via balanço de transferência de massa e energia.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em 5 principais seções, Introdução; Referencial Teórico; Metodologia; Resultados e Discussões e Considerações Finais. Na introdução são descritos os objetivos e justificativas para a realização do trabalho, além dos aspectos iniciais a respeito da secagem, do secador a ser utilizado e da biomassa

escolhida. O referencial teórico aborda todos os tópicos dos quais o entendimento é necessário para a realização da pesquisa. A metodologia apresenta as ferramentas que foram utilizadas para viabilizar a concretização dos objetivos descritos no item 1.1. Já os resultados e discussões apresentam todos os dados obtidos com a utilização do protótipo, assim como as análises comparativas entre estes dados e as considerações finais descrevem de forma sucinta a contribuição deste trabalho para o estado da arte da tecnologia explorada e cita os próximos passos que possíveis trabalhos posteriores a estes podem seguir.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONCEITOS BÁSICOS DE SECAGEM

A definição básica de secagem consiste na diminuição do teor de água de um determinado elemento, este processo é realizado desde os primórdios da civilização e tem como principal objetivo prolongar o tempo que um alimento é viável para o consumo. Este processo pode ser realizado de forma natural, onde submete-se o alimento a exposição solar afim de desidratar o mesmo (EMBRAPA, 2010).

Com o avanço da sociedade surgiram novas demandas, com o êxodo rural e o início da concentração da população nas grandes cidades houve a necessidade do crescimento das atividades agroindustriais, que por sua vez iniciaram as produções em massa de determinados produtos alimentícios. A secagem natural não seria capaz de atender a necessidade de conservação destes alimentos, uma vez que a produção pode acontecer até em continentes diferentes do local de consumo. Assim sendo, surgiu a necessidade de desenvolvimento de técnicas de secagem artificiais para possibilitar que os produtos se conservassem até a destinação final e a produção pudesse ser realizada em escala, como a sociedade necessitava (EMBRAPA, 2010).

2.2 TIPOS DE SECADORES ARTIFICIAIS

Como dito anteriormente as demandas da sociedade levaram à iminente necessidade do desenvolvimento de secadores artificiais, foram criados diversos tipos de secadores, que podem se dividir em três grandes grupos: secadores de leito fixo, secadores intermitentes e secadores contínuos.

Os secadores de leito fixo são caracterizados por possuírem uma coluna de secagem composta por duas câmaras: a câmara de secagem, que acomoda o produto a ser seco e a câmara pletum, que promove a distribuição da pressão do ar da secagem. Além desta coluna estes secadores são compostos por um ventilador e uma fornalha (EMBRAPA, 2001).

Já os secadores do tipo intermitente são caracterizados por possuírem dois períodos: um no qual recebem fluxo de ar aquecido e outro no qual o produto passa por repouso. Os

principais componentes deste tipo de secador são a fornalha, o difusor de ar, o funil de carga, o ventilador e a câmara de secagem, esta última é onde fica localizado um depósito, que é utilizado para o período de repouso (EMBRAPA, 2001).

Os secadores contínuos por sua vez, são caracterizados por possuírem uma eficiência maior comparada as eficiências dos secadores citados anteriormente. Estes secadores contínuos são compostos basicamente de ventiladores axiais, difusores de ar, um sistema de descarga e uma coluna de secagem, onde ocorre a secagem e o resfriamento dos grãos de forma contínua (EMBRAPA, 2001).

2.2.1 Secador Rotativo

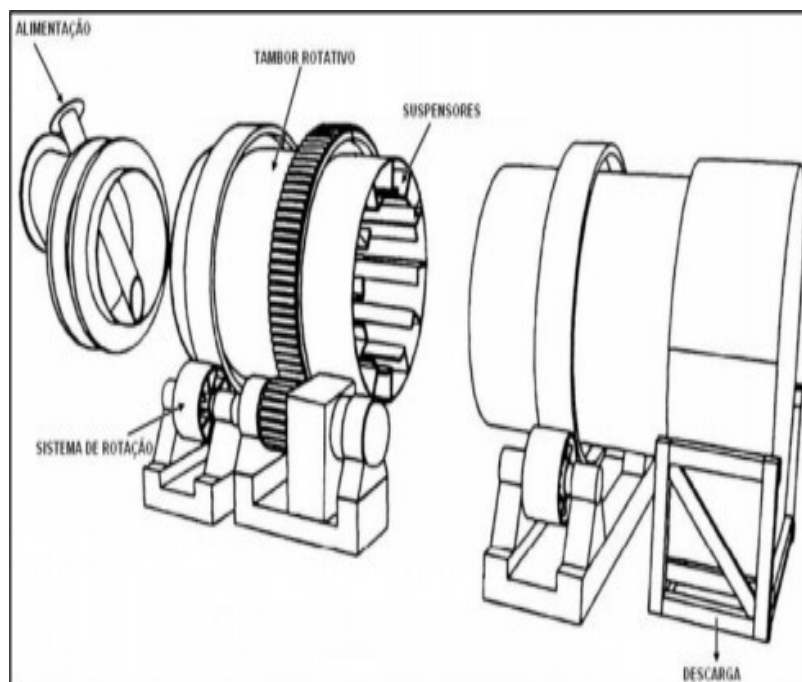
Alguns secadores foram tomados como estudo de caso pelo grupo de pesquisa Tecnologias Limpas, para o escopo deste trabalho utilizou-se o secador do tipo rotativo, com transferência de calor por convecção e fluxo concorrente. A estrutura básica deste secador é composta por um tambor cilíndrico que gira em torno de um eixo. Neste secador o produto a ser seco é inserido em uma das extremidades e percorre o equipamento nos sentidos axial e radial (CHUN; LIM; YOSHIAWA, 2012).

As principais vantagens de um secador rotativo são o baixo custo de construção, o baixo custo de manutenção e a facilidade de operação. Os secadores rotativos podem ser utilizados nas mais diversas aplicações, tais como: produção de fertilizantes, tratamento de esgoto, produção de açúcar, secagem de grãos, entre outros (SILVA *et al*, 2012).

Os secadores rotativos podem ter dois tipos de fluxo: o fluxo concorrente e o fluxo contracorrente. No fluxo concorrente o produto a ser seco e o ar de secagem são inseridos no mesmo lado do equipamento, o que resulta que ambos terão o mesmo sentido. Já no fluxo contracorrente, o ar de secagem é inserido no lado oposto ao lado onde são colocados os materiais a serem secos, o que resulta que estes estarão se deslocando em sentidos opostos.

A escolha do tipo de fluxo de um determinado secador é feita de acordo com a aplicação para qual este se destina e pode ser realizada com base em diversos fatores.

Figura 1: Secador rotativo de fluxo concorrente.



Fonte: (SILVA *et al*, 2012).

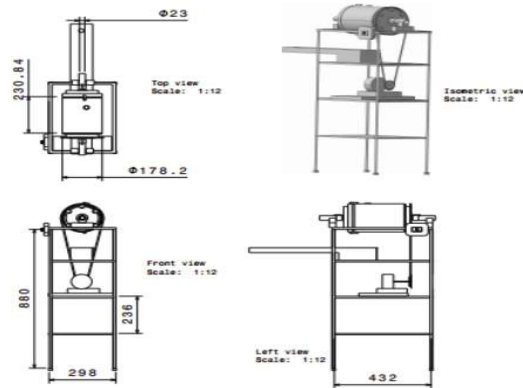
Um importante elemento dos secadores rotativos está ilustrado na figura 1, os suspensores, responsáveis por promover o cascadeamento da biomassa durante o processo de secagem. Esta parte do processo possui uma grande importância, principalmente na secagem de grãos.

2.3 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO SECADOR ROTATIVO PROTÓTIPO

O grupo Tecnologias Limpas sob a orientação do Professor Dr. Felix Matin Carbajal Gamarra começou a idealizar a construção de um secador rotativo protótipo, que foi desenvolvido durante o Trabalho de Conclusão de Curso da Aluna Livia Araújo.

A idealização do equipamento foi realizada por meio de desenhos esquemáticos no software CATIA, que são mostrados na figura 2.

Figura 2: Desenhos esquemáticos de protótipo de secador rotativo



Fonte: (ARAÚJO,2017).

Após a idealização básica da estrutura, o protótipo foi construído em diversas etapas que são descritas nos tópicos subsequentes.

2.3.1 Construção do tambor rotativo

Seguindo o pressuposto de utilizar materiais recicláveis e de baixo custo de aquisição na construção do protótipo o grupo de pesquisas optou por utilizar um barril de *chopp* da marca *Heineken* de 5 litros de volume, pois este tambor é de material metálico e possui um esmalte interno adaptado ao contato com alimentos em diversas temperaturas, além de permitir um menor custo de produção e externalidades positivas no sentido de sustentabilidade e consumo consciente, além de ser leve e compacto.

Em seguida, foram instalados suspensores de 10 cm de comprimento no sentido longitudinal do equipamento, com o objetivo de promover o cascadeamento dos grãos.

Figura 3: Parte interna do tambor com suspensores.



Fonte: (ARAÚJO,2017).

Foram feitos ajustes no tambor tais com inserção de tábuas de madeira circulares nas extremidades para promover uma rotação em torno do eixo e a inserção de presilhas de pressão para imobilizar o equipamento durante o funcionamento, além de um funil na parte superior para promover a inserção das amostras no equipamento (ARAÚJO,2017).

Figura 4: Tambor com estruturas para promover a rotação do equipamento e local para a inserção dos grãos.



Fonte: (ARAÚJO,2017).

2.3.2 Construção do eixo fixo.

Um cilindro metálico circular de 42 cm de comprimento foi usado como eixo. Foram feitos diversos furos para este não interferir na passagem do ar da secagem, o cilindro possui diâmetros diferentes nas extremidades, onde na extremidade menor foram passados os fios do sistema de sensoramento e na extremidade maior foi encaixado o bocal onde foi colocado o equipamento que fornece o ar.

Figura 5: Eixo fixo.



Fonte: (ARAÚJO, 2017).

2.3.3 Construção da estrutura de suporte.

Para o suporte do secador foi usada uma estante de plástico com 3 estruturas retangulares de diferentes alturas, como é mostrada na figura 09, o que permite o apoio do tambor, do motor e do equipamento que irá soprar o ar, esta estrutura é leve e é fácil transportá-la o que agrega benefícios ao conjunto do protótipo.

Figura 6: Estrutura de Suporte.



Fonte: (ARAÚJO, 2017).

2.3.4 Seleção do motor

O secador rotatório demanda energia mecânica para promover sua rotação, isto é promovido a partir de um motor, que é uma máquina síncrona, então quando alimentado com energia elétrica imprime energia mecânica na forma de rotação no tambor. Para dimensionar este motor foram feitos cálculos preliminares na massa máxima que o secador pode suportar com base no seu volume e na densidade dos grãos, assim como os cálculos do torque demandado para iniciar a rotação e a potência mínima com a qual o sistema é acionado.

2.3.5 Sistema de transmissão

A energia mecânica precisa ser transferida do motor para o tambor, para tanto é necessário um sistema de transmissão que foi construído com base em uma correia do tipo corrente e uma polia na forma de coroa. Devido ao baixo custo desse sistema e ao fato de que como as velocidades de rotação demandadas pelo tambor são baixas a transmissão foi feita de forma que o diâmetro do eixo do motor seja muito menor que a polia na qual o eixo do tambor está conectada, o que causa uma redução da rotação inicial entregue pelo motor

Figura 7: Sistema de transmissão por corrente e coroa.

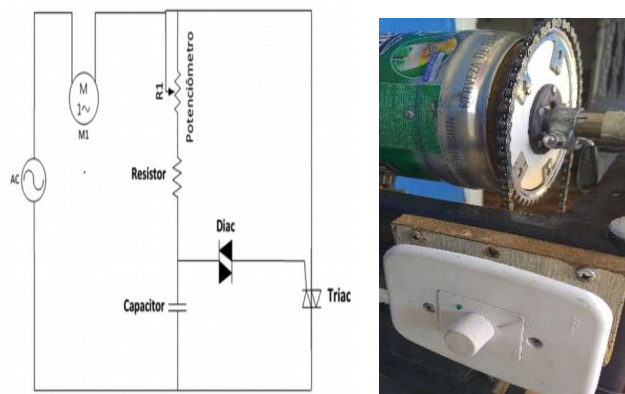


Fonte: (ARAÚJO, 2017).

2.3.6 Instalação Circuito de Potência

Como dito no item anterior a rotação do motor é bem maior que a rotação demandada pelo tambor, assim sendo além de um sistema de transmissão do tipo redutor foi necessária a instalação de um dispositivo que pudesse controlar a velocidade do tambor, para tanto foi feito um circuito de potência do tipo conversor CA/ CA por Araújo, (2017), uma vez que o objetivo era apenas adequar a potência fornecida e não converter o tipo de sinal, onde com alguns componentes eletrônicos tais como o potenciômetro foi possível controlar a rotação do tambor. O esquemático do circuito usado e o dimmer são mostrados na figura 8.

Figura 8: Esquemático de circuito de potência e dimmer instalado na estrutura.



Fonte: (ARAÚJO, 2017).

2.3.7 Desenvolvimento do sistema de fornecimento de ar

Como na literatura conta que a faixa de temperatura para secagem de grãos não costuma ser muito alta, optou-se por utilizar um secador de cabelos como instrumento de fornecer ar de secagem, uma vez que estes dispositivos normalmente operam em faixas próximas a 50 ° C e são os dispositivos com menor custo e de fácil acesso (ARAÚJO, 2017), o secador escolhido e o acoplamento do mesmo a estrutura são mostrados na figura 9.

Figura 9: Equipamento de fornecimento de ar acoplado a estrutura.



Fonte: (ARAÚJO, 2017).

Figura 10: Protótipo de secador rotativo.



Fonte: (ARAÚJO, 2017).

O resultado final do protótipo do secador rotativo é apresentado na figura 10.

2.4 PSICOMETRIA

A psicometria pode ser descrita com o estudo das propriedades das misturas entre o ar seco e o vapor de água, assim como o comportamento das misturas constituídas por estes. Quando estudamos estas misturas adotamos a simplificação de considerar o ar atmosférico como um gás ideal, pois como vapor de água também é encontrado em pressões baixas esta não é uma consideração que resultará em grandes erros associados (CASTILLO, 1992).

Após diversos estudos considerando a simplificação do ar como um gás ideal, o que torna as misturas ideais a uma pressão constante (a atmosférica), os pesquisadores concluíram que em termos de engenharia os cálculos e medições posteriores deveriam ser feitos com base na massa de ar seco (CASTILLO, 1992).

2.4.1 Umidade

A umidade do ar representa a massa de vapor de água que está contida em uma unidade de massa de ar seco, esta umidade dependerá da pressão parcial do vapor de água presente na mistura, desde que esta pressão parcial seja determinada em termos da pressão atmosférica (CASTILLO, 1992).

2.4.2 Umidade de saturação

Chamamos de ar saturado o estado em que o vapor de água presente no ar se encontra nas mesmas condições de pressão e temperatura que a água no estado líquido, assim sendo, a pressão parcial do vapor de água presente no ar saturado será a pressão do vapor de água na temperatura de saturação do ar (CASTILLO, 1992).

2.4.3 Umidade relativa

Segundo CASTILLO (1992) a umidade relativa representa a razão entre a pressão parcial do vapor de água e a pressão deste vapor com relação a temperatura de saturação.

$$H_R = \left(\frac{P}{P_A} \right) 100 \quad (2.1)$$

Onde:

- H_R é a umidade relativa expressa em porcentagem.
- P é a pressão parcial do vapor de água.
- P_A é a pressão do vapor de água na temperatura de saturação.

2.4.4 Porcentagem de umidade

A porcentagem de umidade é a razão entre a umidade do ar e a umidade de saturação.

$$H_A = H_R \left(\frac{1 - P_A}{1 - P} \right) \quad (2.2)$$

Onde:

- H_A é a porcentagem de umidade.
- H_R é a umidade relativa expressa em porcentagem.
- P é a pressão parcial do vapor de água.
- P_A é a pressão do vapor de água na temperatura de saturação.

2.4.5 Calor específico do vapor de água

O calor específico do ar vapor de água é a quantidade de calor necessária para elevar em 1 °C 1 grama de ar seco com sua umidade correspondente.

$$C_{AU} = C_{p1} + C_{p2} H \quad (2.3)$$

Onde:

- C_{AU} é o calor específico do vapor de água.
- C_{p1} é o calor específico do ar seco.
- C_{p2} é o calor específico do vapor de água.
- H é a umidade.

2.4.6 Ponto de orvalho

O ponto de orvalho é descrito quando a temperatura com a qual o vapor de água atinge sua temperatura de saturação e condensa com pressão constante (CASTILLO, 1992).

2.4.7 Temperatura de bulbo seco

A temperatura de bulbo seco pode ser descrita como a temperatura que o ar tem quando medida em um termômetro com o bulbo totalmente seco após atingido o equilíbrio térmico (CASTILLO, 1992).

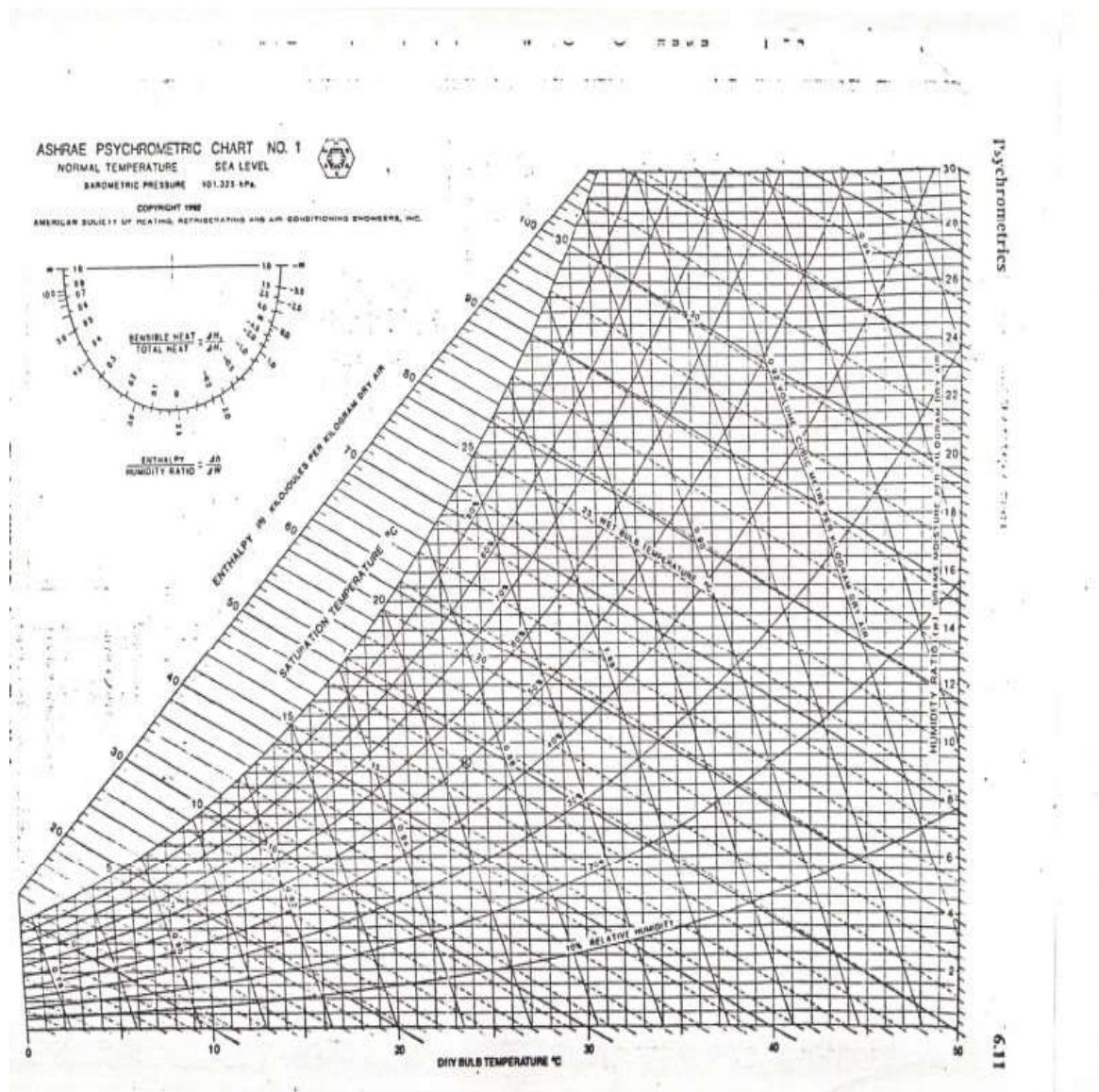
2.4.8 Temperatura de bulbo úmido

A temperatura de bulbo úmido é a temperatura mais baixa alcançada pela evaporação da água, podemos ver este fenômeno por meio da submissão de uma pequena massa em temperaturas adiabáticas a uma corrente de ar, como a massa da água é muito menor que a do ar, os efeitos do processo são considerados apenas na água, desprezando-se as mudanças nas propriedades físicas do ar (CASTILLO, 1992).

2.4.9 Carta psicrométrica

Todas as propriedades da mistura entre o ar e o vapor d'água podem ser encontradas na chamada carta psicrométrica, que nada mais é que um gráfico com diversas propriedades correlacionadas desta mistura, estes gráficos normalmente são elaborados de acordo com a necessidade das informações demandadas pela aplicação, nesta carta podemos obter dados a partir de alguns valores conhecidos principalmente nas variáveis descritas nos itens anteriores do capítulo 2.4 e em algumas outras. Um exemplo de carta psicrométrica é apresentado a seguir.

Figura 11: Carta Psicométrica.



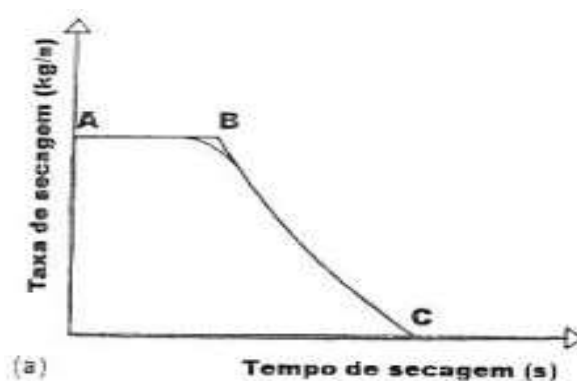
Fonte: ASHRAE(2002).

25 FENÔMENOS DE TRANSPORTE E AS ETAPAS DA SECAGEM

Durante o processo de secagem há transferência de um líquido de uma região para outra. Esta transferência estará diretamente ligada aos cálculos das propriedades de transporte dos fluídos envolvidos, tais como a difusividade do líquido e do vapor, o escoamento capilar e os escoamentos devido aos gradientes de pressão e temperatura.

Assim sendo, a secagem é comumente representada por curvas que relacionam o conteúdo de umidade do material em função do tempo de secagem, a taxa de secagem em função do tempo de secagem, a taxa de secagem em função do conteúdo de umidade do material e a temperatura do material em função do conteúdo de umidade do material segundo LISBOA (2005) e como podemos ver na figura 12.

Figura 12: Gráficos de taxa de secagem vs tempo.



Fonte: LISBOA (2005) com adaptações.

O gráfico acima é de extrema importância para entender as etapas do fenômeno da secagem. No gráfico observa-se que inicialmente a taxa de secagem é constante e somente após um período de tempo esta começa a decair, até chegar ao ponto 0, que corresponde ao ponto onde o elemento está completamente seco (LISBOA, 2005).

Este período de taxa constante agrega diversas informações ao fenômeno, uma vez que neste toda a água que não está em contado direto com a superfície do produto que está sendo seco é removida por evaporação.

Observa-se também que nesta fase, onde calor convectivo é fornecido, a secagem ocorre na chamada temperatura de bulbo úmido e assim sendo, a difusão do fluxo de ar

será igual a quantidade de calor que o ar fornece para a superfície do secador, o que fará com que o produto a ser seco assumirá a temperatura de bulbo úmido do ar correspondente nas condições de temperatura e umidade do ar de secagem (NONHEBEL; MOSS, 1971).

Todos estes processos em cadeia resultarão que se o ar de secagem permanecer constante no período de taxa de secagem constante a temperatura de superfície do cilindro do secador também permanecerá constante, o que culminará na pressão parcial e a umidade serem os valores correspondentes nos valores de saturação a temperatura do bulbo úmido (NONHEBEL; MOSS, 1971).

Já no período decrescente a taxa de secagem será controlada pela migração da água de dentro do produto a ser seco até a superfície do tambor do secador por meio do escoamento capilar com relação aos poros do material, neste período a temperatura e a umidade não se sustentam nos valores de saturação e o decaimento da taxa de secagem se dará de acordo com o material, em materiais mais porosos o processo ocorrerá mais rápido, pois a água sairá dos poros onde se encontram mais rapidamente e entrará em contato com a superfície do secador onde evaporará (NONHEBEL; MOSS, 1971).

Já no período decrescente a taxa de secagem será controlada pela migração da água de dentro do produto a ser seco até a superfície do tambor do secador por meio do escoamento capilar com relação aos poros do material, neste período a temperatura e a umidade não se sustentam nos valores de saturação e o decaimento da taxa de secagem se dará de acordo com o material, em materiais mais porosos o processo ocorrerá mais rápido, pois a água sairá dos poros onde se encontram mais rapidamente e entrará em contato com a superfície do secador onde evaporará (NONHEBEL; MOSS, 1971).

26 TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA APLICADOS A SECAGEM

O processo de secagem pode na maioria das vezes ser descrito como uma combinação da transferência de calor e da transferência de massa entre dois estados distintos de uma região submetida a secagem. A adição de calor induz a realização da transferência de calor devido ao aumento da temperatura, porém esta adição de calor também induz a diminuição da umidade no material a ser seco, fazendo com que o processo de transferência de massa seja acelerado (LISBOA, 2005).

Assim sendo os processos de transferência de calor e massa serão descritos pelos gradientes de temperatura e umidade, além disto detalharemos os mecanismos de transferência de calor e massa, uma vez que cada diferente processo de secagem pode

utilizar diferentes mecanismos

2.6.1 Transferência de Calor

Nos processos de secagem na maioria das vezes a transferência de calor pode ser descrita em termos de diferença de potenciais, o potencial que descreve esta transferência é o gradiente de temperatura, que parte do princípio da variação de entalpia. A relação que descreve esta aplicação do gradiente de temperatura é a capacidade térmica que é descrita pela equação 2.4, onde a capacidade térmica será igual a razão entre a variação de entalpia e a variação de temperatura em um regime a pressão constante (LISBOA, 2005).

$$C_p = \frac{\partial H}{\partial T} \quad (2.4)$$

Onde :

- C_p é a capacidade térmica calculada em $\left(\frac{J}{Kg \cdot K} \right)$.
- H é a entalpia medida em $\left(\frac{J}{Kg} \right)$
- T é a temperatura em (K).

2.6.1.1 Transferência de Calor por Condução

A condução é um mecanismo de transferência de energia que ocorre devido a interação das moléculas, a transferência ocorre no sentido de partículas mais energéticas para partículas menos energéticas. Este fenômeno pode ocorrer em sólidos, líquidos e gases. Nos líquidos e gases este é explicado pela colisão e difusão entre as moléculas que se movem de forma aleatória, já nos sólidos a explicação do fenômeno vem da vibração das moléculas em rede e assim sendo, a energia é transportada por elétrons livres (ÇENGEL, 2012).

$$Q_{\text{Condução}} = KA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} \quad (2.5)$$

Onde:

- K é a condutividade térmica do material em $\left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$.
- A é a área em (m^2) .
- T_1 e T_2 são as temperaturas em (K).
- Δx é a espessura do material em (m).

A taxa referente a transferência de calor por convecção é descrita na equação 2.7. Desta forma, a secagem por condução de acordo BAKER (1983) ocorre de forma indireta, por meio de parede ou outra superfície aquecida, que transfere calor ao material a ser seco calor ao entrar em contato com este. Assim sendo, por meio deste aumento de temperatura que é imposta ao material inicia-se o processo de evaporação que culmina com a secagem.

2.6.1.2 Transferência de Calor por Convecção

A convecção consiste na transferência de energia na forma de calor entre uma superfície sólida e o líquido ou gás que está adjacente a esta superfície, esta ocorrência se dá por meio de dois fenômenos simultâneos, a transferência de calor por condução e o movimento do fluido. A relação entre o movimento do fluido e a transferência de calor por convecção é diretamente proporcional, ou seja, quanto mais rápido o fluido está se movendo maior transferência de calor por convecção irá existir (ÇENGEL, 2012).

$$Q_{Conectivo} = h A_s (T_s - T_{\infty}) \quad (2.6)$$

A taxa referente a transferência de calor por convecção é descrita na equação 2.6. Assim sendo, este mecanismo atua na secagem quando há contato direto entre o material a ser seco e o agente de secagem, que na maioria das vezes é o ar aquecido. Este referido agente de secagem (ar) passará pelo material sólido ou líquido e provocará no mesmo a evaporação, que resultará na secagem (BAKER, 1983).

2.6.1.3 Transferência de Calor por Radiação

A transferência de calor por radiação é caracterizada pela inexistência da necessidade de um meio para a energia se propagar, esta transferência ocorre na velocidade da luz.

O estudo desta transferência é feito com base na radiação térmica, que nada mais é que a radiação emitida pelos corpos devido a sua temperatura. Diferente dos outros mecanismos de transferência de calor na radiação um corpo de menor temperatura pode transferir calor para um corpo de maior temperatura uma vez que todo e qualquer corpo com temperatura acima do zero absoluto possui radiação térmica. Assim, emissão ocorre quando por elevação da temperatura são emitidas ondas eletromagnéticas, que por sua vez podem ser absorvidas, refletidas ou transmitidas por outro corpo (ÇENGEL, 2012).

$$Q_{\text{Radiação}} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{\text{circular}}^4) \quad (2.7)$$

Onde:

- ε é a emissividade da superfície

- σ constante de Stefan Boltzmann $\left(\frac{W}{m^2 T^4} \right)$.

- T_s é a temperatura da superfície em (K).

- T_{circular} é a temperatura do meio em (K).

A taxa de transferência de calor é dada pela equação 2.7, a radiação não costuma ser o mecanismo principal de transferência de calor para os processos de secagem, com exceção de secadores com infravermelho, porém em todo regime de operação com temperaturas acima de 323 K ou 50° C há uma pequena parcela de transferência por radiação nos mecanismos de natureza condutiva ou convectiva.

Assim sendo para operações acima da temperatura citada as taxas de transferência de calor serão ligeiramente superiores ao valor calculado devido aos efeitos de radiação (BAKER, 1983).

2.6.2 Transferência de Massa

A transferência de massa consiste basicamente na tendência natural de diminuição da diferença de concentração entre dois elementos de um sistema, o transporte de massa irá ocorrer no sentido da região de maior concentração para a região de menor concentração, esta transferência pode ocorrer de duas formas, pelo movimento molecular de fluídos que não estão em movimento ou ainda , de uma superfície para um fluído em movimento, este último sendo conhecido como transporte de massa convectivo (LISBOA, 2005).

Da mesma forma transferência de calor, a transferência de massa também pode ser descrita em termos de diferença de potenciais, porém o potencial que descreve esta transferência não é dado de forma intuitiva como acontece na transferência de calor. Pois, para obter a relação que descreve este gradiente precisamos realizar uma analogia entre a escala de temperatura com a escala de umidade.

A relação que descreve a transferência de massa será conhecida como capacidade mássica, que consistirá na razão entre a variação isotérmica do conteúdo de umidade e o grau de umidade em um regime de temperatura constante (LISBOA, 2005).

$$C_M = \frac{\partial M}{\partial G_R} \quad (2.8)$$

Onde:

• C_M a capacidade mássica calculada em $\left(\frac{Kg}{Kg \cdot ^\circ M} \right)$.

• M é o conteúdo de umidade medido em (Kg).

• G_R é grau de umidade descrito a seguir pela equação 2.9 e é medido em $\left(\frac{Kg}{^\circ M} \right)$.

$$G_R = \frac{M^0}{C_M^0} = \left(\frac{M^0}{M_{Máx}^0} \right) \cdot 100 \quad (2.9)$$

Onde:

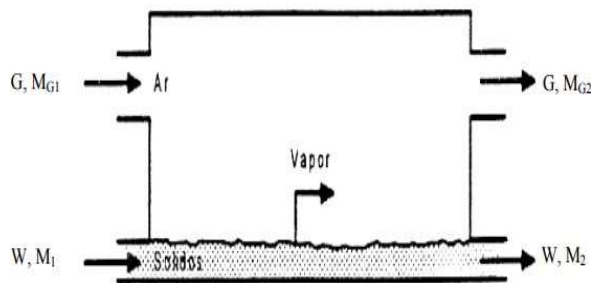
- M^0 é a escala do grau de umidade do material padrão.
- c_M^0 é a capacidade mássica média da umidade para o material padrão
- $M_{Máx}^0$ é o valor máximo para a escala do grau de umidade do material padrão.

2.7 BALANÇOS DE MASSA E ENERGIA

Como o processo estudado é baseado em transferências de massa e de energia, o estudo do balanço das mesmas pode trazer contribuições para o entendimento do fenômeno da secagem, assim como para a caracterização do equipamento utilizado.

2.7.1 Balanço de Massa

Figura 13: Esquema de transporte de massa em secador rotativo com fluxo concorrente.



Fonte: (LISBOA, 2005)

O balanço de massa para um sistema com fluxo concorrente é mostrado figura 13.

$$W (M_1 - M_2) = G (M_{G2} - M_{G1}) \quad (2.10)$$

Onde:

- W corresponde a taxa em massa de sólido em $\left(\frac{Kg}{s} \right)$.

- G corresponde a taxa em massa de ar seco em $\left(\frac{Kg}{s}\right)$.
- M corresponde a umidade em base seca dos sólidos em $\left(\frac{Kg}{Kg}\right)$.
- M_G corresponde a umidade em base seca do ar em $\left(\frac{Kg}{Kg}\right)$, o índice 1 indica entrada e o índice 2 indica saída.

Segundo Lisboa (2005) o transporte de massa para o secador rotatório em operação contínua é dado pela equação 2.10. Porém sabe-se que a descrição acima foi realizada de forma simplificada uma vez que em operações reais dificilmente o regime será contínuo, assim sendo, as propriedades acima sempre estarão variando com o espaço e o tempo, tornando o regime do tipo batelada. Para este regime de operação as grandezas precisam ser expressas na forma diferencial.

$$\frac{\partial}{\partial t}(M\rho_s(1-\varepsilon)Az) = \frac{\partial}{\partial z}(M_G G_z) + \frac{\partial}{\partial t}(M_G \rho_G F_A Az) \quad (2.11)$$

Onde:

- t corresponde ao tempo em (s).
- M ao número adimensional que representa a umidade em base seca dos sólidos em $\left(\frac{Kg}{Kg}\right)$.
- M_G corresponde ao número adimensional que representa umidade em base seca do ar em $\left(\frac{Kg}{Kg}\right)$.
- ρ_s é a densidade do sólido em $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$.
- ρ_g é a densidade do ar em $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$.
- A é a área de contato entre o sólido e o ar em (m²)
- ε é a porosidade do leito que os sólidos ocupam

- f_A é a fração da área transversal que o gás ocupa.
- G corresponde a taxa em massa de ar seco em $\left(\frac{Kg}{s}\right)$
- Z é a posição em coordenadas cartesianas em (m).

Desta forma, o balanço de massa será descrito pela equação 2.11 quando adotadas as considerações descontinuidade no regime de operação do secador.

2.7.2 Balanço de Energia

Para determinar o balanço de energia de qualquer sistema é necessário inicialmente verificar as formas de energia presentes no sistema, sendo estas formas calor e trabalho. Este tipo de análise é feita com base nas leis da termodinâmica. A primeira lei da termodinâmica diz que em um sistema nenhuma energia é perdida, mas sim convertida entre suas diferentes formas, já a segunda lei tratada não apenas da quantidade de energia, mas de sua qualidade e descreve as equações que permitem realizar o balanço energético de um sistema. Com base na primeira lei da termodinâmica temos que em um sistema aberto, ou seja, em um sistema no qual há massa passando por sua fronteira, que é o que ocorre com os secadores, o balanço de energia é dado pela equação 2.12 (ÇENGEL, 2006).

$$\Delta E = \Sigma Q + \Sigma W \quad (2.12)$$

Onde:

- ΔE é a variação da energia.
- Q é a taxa de calor.
- W é a taxa de potência.

A principal forma de energia estudada no fenômeno da secagem é o calor, em um secador com mecanismo de transferência de calor convectivo podemos determinar a taxa de transferência de calor do ar para o sólido que está sendo seco.

$$Q = h A_s (T_s - T_\infty) \quad (2.13)$$

Onde :

- h é coeficiente de transferência de calor convectivo em (W/m². K).
- A_s a área superficial.
- T_s a temperatura da superfície.
- T_∞ a temperatura do fluido no caso o ar em (K).

A taxa de transferência de calor é determinada pela lei de resfriamento de Newton descrita na equação 2.13.

Se é desejado obter valores mais precisos e adequados, como é o caso na operação de secagem, pois neste haverá convecção forçada interna e o mesmo opera por meio do mecanismo convectivo de transferência de calor, podemos considerar este equipamento como um trocador de calor, podemos utilizar a variação da lei de resfriamento de Newton.

$$Q = U_{VA} V \Delta T_{ln} \quad (2.14)$$

Onde:

- U_{VA} é o coeficiente volumétrico de transferência de calor global em $\frac{W}{m^2 \cdot K}$.
- V é a velocidade do ar em $\frac{m}{s}$.
- ΔT_{ln} é a variação média logarítmica da temperatura e é detalhada na equação 2.15.

$$\Delta T_{ln} = \frac{T_e - T_i}{\ln \frac{T_s - T_e}{T_s - T_i}} \quad (2.15)$$

Onde:

- T_e é a temperatura de saída do ar.
- T_i é a temperatura de entrada do ar.
- T_s é a temperatura de saída do ar.

O secador rotativo tomado como estudo de caso e apresentado no capítulo 2.3 possui suspensores, que nada mais são que “pás” que auxiliam a realização do cascadeamento do grãos a serem secos, secadores com esta característica possuem outras peculiaridades no cálculo de sua taxa de transferência de calor uma vez que a existência dos mesmos influencia no valor desta taxa (MILLER;SMITH;SCHUETTE,1942) .

Para secadores com 6 suspensores é necessário que o termo U_{VA} da equação 2.14 seja descrito pela equação 2.16.

$$U_{VA} = \frac{0,652 (N - 1) G^{0,46}}{D} \quad (2.16)$$

Assim como para secadores com 12 suspensores U deve ser calculado por pela equação 2.17.

$$U_{VA} = \frac{0,145 (N - 1) G^{0,60}}{D} \quad (2.17)$$

Onde:

- D é o diâmetro em (m).
- N é o número de suspensores.

- G é o escoamento mássico de ar em $\frac{Kg}{m^2 \cdot h}$.

3 METODOLOGIA

3.1 MATERIAIS

A biomassa escolhida para realizar os estudos foram grãos característicos da região Centro-Oeste, para estimular e promover a produção dos mesmos nesta localidade, dentre a grande diversidade de grãos cultivados nesta região foram escolhidos especificamente os grãos de café e milho, pois estes apresentam uma geometria mais similar a do tambor utilizado no secador, diminuindo então, os erros experimentais que possivelmente poderiam ser gerados pela interface do contato biomassa-equipamento.

Figura 14: Café e milho utilizados nos ensaios.



Fonte: Elaboração Própria.

Para todos os ensaios descritos foram utilizadas quantidades de 100 g de cada um dos grãos, o pré-tratamento das amostras consistiu em cortar os grãos de milho da espiga e catar os grãos de café do pé e limpar as impurezas contidas nos mesmos.

Figura 15: Grãos de café e milho após pré-tratamento.



Fonte: Elaboração Própria.

Foi utilizado o secador rotativo protótipo apresentado no tópico 2.3 para realização dos testes que serão descritos a seguir no tópico 3.2, foram realizados alguns ajustes construtivos neste protótipo para adaptá-lo aos interesses do escopo deste trabalho, estes ajustes serão detalhados na tópico 4.1.

Figura 16: Secador rotativo protótipo.



Fonte: Elaboração Própria.

3.1 MÉTODOS

3.1.1 Condições de ensaio

Todos os ensaios foram realizados no mínimo em tréplica para assegurar a confiabilidade dos dados. As tréplicas foram realizadas todas no mesmo dia e mesmo local, de forma que não houveram variações significativas da umidade local entre os ensaios para um mesmo grão.

Foi escolhida a quantidade de 100 g de grãos para realizar os ensaios que permitiram a obtenção dos dados apresentados nos capítulos 4.2 e 4.3, esta escolha se deu mediante a ponderação do valor de subcarga (ocupação de menos que 15% do volume do secador) e sobrecarga (ocupação de mais de 70% do volume do secador). A vazão e velocidade do ar de secagem foram mantidos constantes, assim como a velocidade de rotação no tambor.

A interrupção dos ensaios foi realizada quando cada um dos grãos atingiu o percentual de umidade relativa descrita na literatura como adequada para os mesmos, 13% para o milho e na faixa de 10,2% - 13,5% para o café (EMBRAPA, 2010).

3.1.2 Eficiência Energética

3.1.2.1 Balanço de Massa

O balanço de massa foi realizado com aferições utilizando balança digital antes e após os testes de secagem, os resultados obtidos foram comparados com a equação governante 2.11.

3.1.2.2 Balanço de Energia

O balanço de energia depende da energia na forma de calor e da energia na forma de potência. Sendo assim, as aferições para determinar este

balanço foram realizadas em duas partes, foram realizadas medições antes e após a secagem da energia na forma de calor e na forma de potência, em seguida esses dados foram combinados para obter o balanço de energia total deste sistema.

As medições de potência foram realizadas no motor que rotaciona o tambor e no secador que fornece o ar de secagem, para tanto, foi utilizado um amperímetro para verificar a corrente fornecida por estes equipamentos durante a secagem, com este dado e a tensão fornecida pela rede convencional de distribuição de energia elétrica por meio da equação 2.19 foi possível determinar a potência instantânea fornecida por estes equipamentos.

$$P = VI \quad (2.1)$$

Onde:

- P é a potência medida em (W)
- V é a tensão em (V)
- I é a corrente em (A)

Em seguida esta potência instantânea foi multiplicada pelo tempo de funcionamento de cada ciclo de secagem para determinar o balanço de energia com os parâmetros relativos ao consumo demandado pelos diferentes tipos de grãos.

Já o balanço de energia do tipo calor foi realizado inicialmente com base na equação governante 2.12 aplicando a consideração que o secador possui uma geometria cilíndrica oca, ou seja, ignorando os suspensores que estão dentro do mesmo, para realizar este cálculo, o coeficiente volumétrico de transferência de calor (U) foi estimado com base em pesquisas das informações técnicas relativas ao secador utilizado e as temperaturas medidas utilizando o sensor DHT22.

3.1.2.3 Transferência de Calor

Por meio da revisão teórica concluiu-se que no secador a transferência de calor ocorre quase exclusivamente por convecção, podendo então os efeitos relativos a condução e a radiação desconsiderados.

Desta forma, a transferência de calor no equipamento foi determinada a partir da equação governante (2.14), com o auxílio de uma trena foram medidos os valores de diâmetro e comprimento do secador afim de determinar o coeficiente volumétrico de transferência de calor global, a velocidade do ar do secador para as condições adotadas nos testes foi obtida no datasheet do fabricante e a variação de temperatura foi medida a partir dos dados obtidos pelo sensor DHT22 e com o auxílio de um termômetro.

3.2.3 Caracterização do Secador

3.2.3.1 Curvas de Secagem

Utilizando os dados de umidade relativa obtida pelo sensor DHT22 durante o processo de secagem, foram elaboradas as curvas de secagem de forma a poder-se analisar a cinética de secagem para os diferentes grãos e realizar análises comparativa e de funcionamento do secador.

3.2.3.2 Carta Psicométrica

Por meio de ensaios controlados que foram impostas variações de temperatura e consequentemente da umidade no equipamento, foram medidas algumas das propriedades descritas no item 2.3, as medições foram realizadas com o sensor DHT 22.

Em seguida, estes dados de temperatura de bulbo seco e umidade relativa aferidos foram exportados para o site “*Flycarpet*”, que nada mais é que um algoritmo que realiza interpolações dos valores das propriedades descritas no capítulo 2.4.

Foram utilizados como *inputs* a temperatura de bulbo seco e a umidade relativa durante a secagem dos grãos de milho, obtidas pelo sensor, e obtidos os *outputs* de relação de taxa de umidade, temperatura de bulbo úmido, temperatura de saturação, entalpia, pressão de vapor e pressão de vapor saturado.

Por fim, estes dados foram exportados para uma planilha excel e então utilizados para plotar os gráficos que culminaram na carta psicométrica para este secador protótipo.

Esses dados foram utilizando um editor de imagens representados na forma de gráfico.

3.2.3.3 Software

Os dados supracitados obtidos por meio do sensor DHT 22 foram lidos com o auxílio do micro controlador *Raspberry* PI 3 *model* B, com o auxílio da linguagem de programação *python* estes dados de temperatura e umidade, após recebidos pelo GBIO da *Raspberry*, foram encaminhados a *lib matplotlib* onde foram transformados em gráficos, que são atualizados em tempo real de acordo com o recebimento dos dados.

3.2.3.4 Manual do Usuário

Todos os dados obtidos no capítulo 3.2.3 foram reunidos em um manual a ser entregue ao usuário para que o mesmo tenha as informações de forma clara e resumida sobre a operação do secador, além destas informações serão colocadas boas práticas de operação e dados mais triviais, como a potência dos equipamentos utilizados, a forma correta de ligar o equipamento, como proceder em casos de problemas técnicos, entre outros.

De forma que o possível “cliente” ao adquirir o produto, mesmo que mais leigo consiga operá-lo e analisar os dados relativos a secagem para confirmar sua conformidade com as especificações normativas relativas ao teor de umidade adequado para os grãos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 AJUSTES CONSTRUTIVOS

4.1.1 Alterações no protótipo

Foram realizadas algumas alterações no protótipo para adaptá-lo aos interesses do escopo deste projeto, de forma a torná-lo perfeitamente operante e capaz de realizar os ensaios demandados. Para isto, optou-se por utilizar um modelo diferente de secador, para obter-se uma variação maior de temperatura do ar injetado, necessário para construir as curvas que serão apresentadas na seção 4.4.1 e 4.4.3.

Além disso foram trocados os conectores que ficam entre o secador e o tambor, pois no sistema antigo havia vazamento de ar, o que prejudicava a integridade dos dados obtidos. Por fim, o equipamento foi desamassado e pintado para torná-lo um produto mais parecido com um modelo comercial.

Figura 17: Comparação do protótipo antes e após ajustes construtivos.

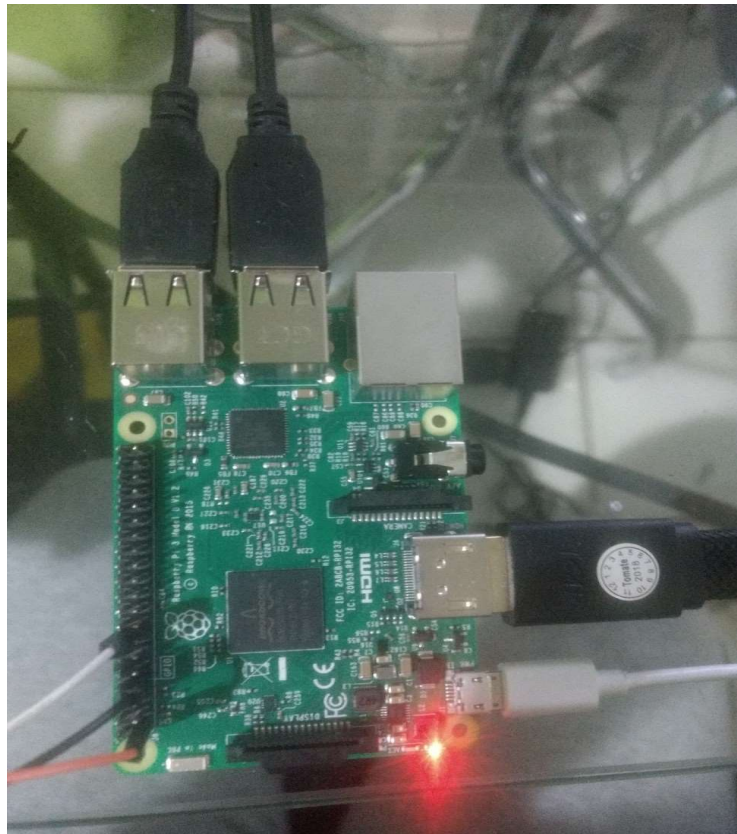


Fonte: Elaboração Própria.

4.1.2 Sistema de obtenção de dados

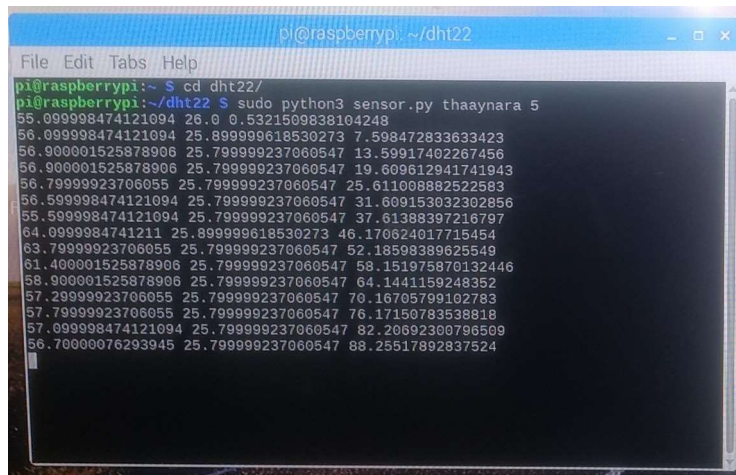
A forma de sensoriamento do equipamento foi refeita, foi adquirido um sensor DHT22 modelo AM2302 para obter os dados de umidade relativa e temperatura durante a secagem, este sensor foi colocado dentro do tambor e a fiação associada ao mesmo foi inserida dentro do eixo do motor. Então, este equipamento foi conectado ao microprocessador *Raspberry* PI modelo 3 B, onde os dados descritos nas próximas seções foram exibidos e tratados.

Figura 18: Sistema de obtenção de dados utilizando *Raspberry* PI.



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 19: Validação de funcionamento do sensor no secador com teste à vazio.



```
pi@raspberrypi:~/dht22
File Edit Tabs Help
pi@raspberrypi:~$ cd dht22/
pi@raspberrypi:~/dht22$ sudo python3 sensor.py thaaynara 5
55.099998474121094 26.0 0.5321509838104248
56.099998474121094 25.899999618530273 7.598472833633423
56.900001525878906 25.799999237060547 13.59917402267456
56.900001525878906 25.799999237060547 19.609612941741943
56.79999923706055 25.799999237060547 25.611008882522583
56.599998474121094 25.799999237060547 31.609153032302856
55.599998474121094 25.799999237060547 37.61388397216797
64.0999984741211 25.899999618530273 46.170624017715454
63.79999923706055 25.799999237060547 52.18598389625549
61.400001525878906 25.799999237060547 58.151975870132446
58.900001525878906 25.799999237060547 64.1441159248352
57.29999923706055 25.799999237060547 70.16705799102783
57.79999923706055 25.799999237060547 76.17150783538818
57.099998474121094 25.799999237060547 82.20692300796509
56.70000076293945 25.799999237060547 88.25517892837524
```

Fonte: Elaboração Própria.

4.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

4.2.1 Balanço de Massa

Todos os ensaios foram realizados com a quantidade padrão de 100 g, as aferições foram realizadas utilizando balança digital.

Figura 20: Aferição da massa dos grãos antes dos ensaios.



Fonte: Elaboração Própria.

Segundo a equação governante (2.10) realizando as considerações de operação em regime permanente e que não há alteração na vazão do ar de secagem o balanço de massa do sistema será:

$$\Delta m = m_e - m_s \quad (4.1)$$

Após o ensaio a massa foi novamente aferida com a mesma balança. As medições foram realizadas em tréplicas e estes valores foram analisados considerando a média e o erro experimental associado a estas, entre a realização dos ensaios o tambor do secador foi aberto e cuidadosamente limpo para evitar que o acúmulo de grãos de ensaios anteriores nos suspensores influenciasse nas medições.

Tabela 1: Aferição da massa após o processo de secagem.

Grão	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média	Erro Experimental
Milho	89 g	85 g	87 g	87 g	$\pm 1,155g$
Café	92 g	92 g	98 g	94 g	$\pm 2,000 g$

Fonte: Elaboração Própria.

Assim sendo, para o milho o balanço de massa é:

$$\Delta m = m_e - m_s$$

$$\Delta m = 100 - 87 \pm$$

$$1,155g \quad \Delta m = 13 \pm$$

$$1,155g$$

Para o café o balanço de massa se dá por:

$$\Delta m = m_e - m_s$$

$$\Delta m = 100 - 94 \pm 2,000 g$$

$$\Delta m = 6 \pm 2,000 g$$

Verifica-se que o balanço de massa apresenta um valor superior para os grãos de milho que para os grãos de café, isto se explica pelo fato da umidade relativa inicial, associada ao teor de água dos grãos, ser maior para o milho. Então, consequentemente a perda interna de água do milho é maior, o que faz com que a sua variação de massa devido a secagem seja superior.

4.2.2 Transferência de Calor

Inicialmente calcularemos a variação de temperatura.

$$\Delta T_m = \frac{T_e - T_i}{\ln \frac{T_s - T_e}{T_s - T_i}}$$

$$\Delta T_{ln} = \frac{47,5 - 38}{\ln \frac{40 - 47,5}{40 - 38}}$$

$$\Delta T_{ln} = 7,19 \text{ K}$$

Calculamos o coeficiente volumétrico de transferência de calor global.

$$U_{VA} = \frac{0,145 (N-1) G^{0,60}}{D}$$

O secador possui 10 suspensores e comprimento aferido de 0,27 m e diâmetro de 0,16

m, a vazão mássica é de aproximadamente $2,25 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$ para este tipo de equipamento, sendo assim:

$$U_{VA} = 13,28 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Com posse destas informações e a velocidade de ar da secagem, obtida por meio das informações do fabricante, teremos que a transferência de calor no secador rotativo protótipo será:

$$Q = U_{VA} V \Delta T_{ln}$$
$$Q = 13,28 \cdot 7,5 \cdot 4,19$$

$$Q = 716,124 \text{ W}$$

4.2.3 Balanço de Energia

A energia na forma de calor durante o processo de secagem foi calculada na seção 4.2.2, para realizar o balanço de energia precisamos, portanto da energia na forma de potência associada ao processo.

Esta potência é oriunda da potência consumida pelo secador e pelo motor de rotação, com um amperímetro pelo teste do circuito aberto foram mensuradas as correntes consumidas durante a operação com carga do secador protótipo, tendo sido obtidos os seguintes valores:

$$I_{\text{secador}} = 5,45 \text{ A}$$

$$I_{\text{motor}} = 2,1 \text{ A}$$

Como ambos funcionam com a tensão fornecida pela rede convencional de energia elétrica (220 V) podemos calcular a potência consumida por estes pela equação (2.19).

$$P_{\text{secador}} = 1199 \text{ W}$$

$$P_{\text{motor}} = 462 \text{ W}$$

Portanto, o balanço de energia do sistema será, pela equação (2.12):

$$\Delta E = \Sigma Q + \Sigma W$$

$$\Delta E = Q_s - Q_e + W_s - W_e$$

Onde os índices “e” e “s” representam respectivamente entrada e saída.

$$\Delta E = Q_s - Q_e + W_s - W_e$$

$$\Delta E = (716,124) - 0 + 0 - (1199 + 462) \text{ W}$$

$$\Delta E = 0 - (716,124) + 0 - (1199 +$$

$$462) \text{ W } \Delta E = - 944,876 \text{ W}$$

O sinal negativo no balanço de energia indica que o consumo de potência é maior que a energia na forma de calor demandada pelo processo de secagem, o que é de acordo com o esperado, pois o objetivo deste sistema é realizar uma operação e para tanto é realizado consumo de energia, que resulta no objetivo final, a secagem do grão.

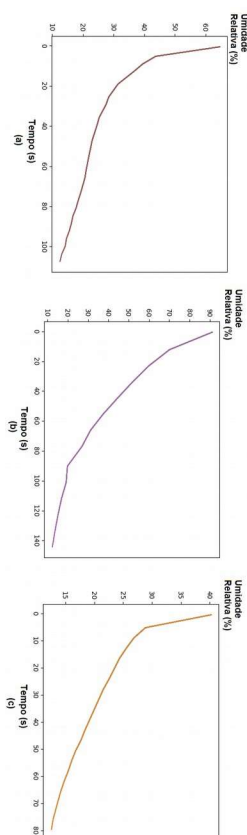
4.3 CARACTERIZAÇÃO DO SECADOR

4.3.1 Curvas de Secagem

De acordo com as condições de ensaio pré-determinadas na seção 3.2.1 e os grãos preparados conforme a seção 3.1 foram realizados repetidos ensaios com os grãos de café e milho afim de obter suas curvas de secagem, que relacionam o decaimento da umidade relativa com o tempo de secagem.

Foram realizados cerca de 12 ensaios com cada um dos grãos, alguns invalidados devido a calibragem do sensor ou erros experimentais de ajuste do equipamento. Dos ensaios bem-sucedidos foram selecionados os 3 resultados mais ilustrativos para cada cultura para serem apresentados, de forma a permitir a elaboração de análises comparativas.

Figura 21: Curvas de secagem de milho.



Fonte: Elaboração Própria.

Por meio dos diversos ensaios verificou-se que o tempo médio de duração da operação de secagem do milho para atingir o teor de umidade de 13%, compatível com as normas para armazenagem de grãos de milho, é de cerca de 110 minutos e que por padrão os grãos antes do processo possuíam umidade relativa de cerca de 65%, podendo este valor variar de acordo com o momento da colheita das espigas de milho e o tempo de armazenamento das mesmas até a realização dos ensaios.

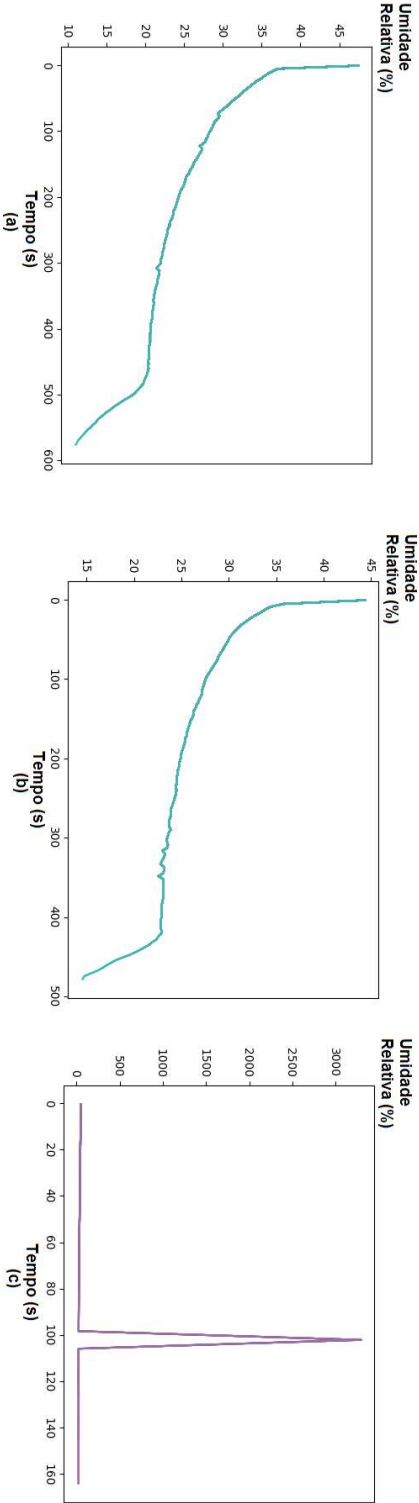
Verifica-se que na curva representada pela figura 21 (b) o teor de umidade inicial é de cerca de 90%, valor bem discrepante aos verificados com os demais ensaios, investigando a causa desta discrepância é possível chegar a uma importante conclusão que será enriquecedora para a elaboração do manual a ser entregue para o usuário, é necessário que o início das medições seja realizado quando tanto o secador quanto o motor de rotação estejam em regime permanente, ou seja, da forma que irão operar durante a secagem.

Como isto não foi realizado durante este ensaio o sensor erroneamente nos primeiros segundos aferiu apenas a umidade do ar de secagem, resultando em uma curva de secagem inconsistente com o padrão.

Já na curva representada pela figura 21 (c) a umidade inicial aferida foi de cerca de 40%, valor abaixo do esperado, analisando as condições do ensaio pode-se atribuir esta discrepância ao fato de o processo de secagem ter sido realizado imediatamente após um ensaio anterior, o que ocasionou que devido ao fato do tambor ainda estar com a temperatura elevada a medição da umidade dos grãos também ter sido medida erroneamente, desta forma a informação de que é necessário esperar um tempo de aproximadamente 5 minutos entre as operações de secagem será inserida no manual do usuário.

A curva representada pela figura 21 (a) ilustra perfeitamente o processo de secagem de milho no secador protótipo e seu comportamento foi observado na grande maioria dos ensaios, sendo esta, portanto a curva escolhida para servir de comparação para operações futuras.

Figura 22: Curvas de secagem de café.



Fonte: Elaboração Própria.

Durante os processos de secagem do café verificou-se que o tempo médio de duração deste processo é de aproximadamente 550 segundos para atingir a faixa recomendada de teor de água de 10,2% - 13,5% e a umidade relativa dos grãos antes da secagem era de aproximadamente 45%. Apesar da umidade relativa ser menor quando comparada a dos grãos de milho o tempo de secagem foi maior, isto ocorre devido a microestrutura dos grãos de café e sua maior resistência associada a casca mais rígida do grão.

O comportamento da curva de secagem do café no secador rotativo protótipo é ilustrado pelas figuras 22 (a) e 22 (b), na figura 22 (c) temos ilustrado um erro de medição que pode ocorrer, o sensor de umidade erroneamente aferiu uma umidade inconforme com o padrão, possivelmente devido a colisão de algum grão com o mesmo, sendo este portanto um dos fatores que precisa ser atentado para que não se prejudique o acompanhamento do processo, como a medição errônea foi pontual, pode-se simplesmente eliminar este dado na planilha de armazenamento e realizar a plotagem do gráfico normalmente, sem comprometimento com a integridade da operação.

4.3.2 Carta Psicométrica

O procedimento experimental descrito na seção 3.2.3.3 resultou nos dados utilizados como base para realizar o esquemático da carta psicométrica, onde os *inputs* são apresentados nas colunas destacadas em cinza e os *outputs* nas colunas em branco.

Os dados medidos experimentalmente foram a umidade relativa (%) e a temperatura de bulbo seco (%), como foram realizados diversos experimentos e réplicas de secagem para os grãos de milho e café, escolheu-se uma amostra destes dados, que combinavam os resultados para estes tipos de grão, além de se assimilarem as curvas padrões quando comparadas com os modelos da literatura.

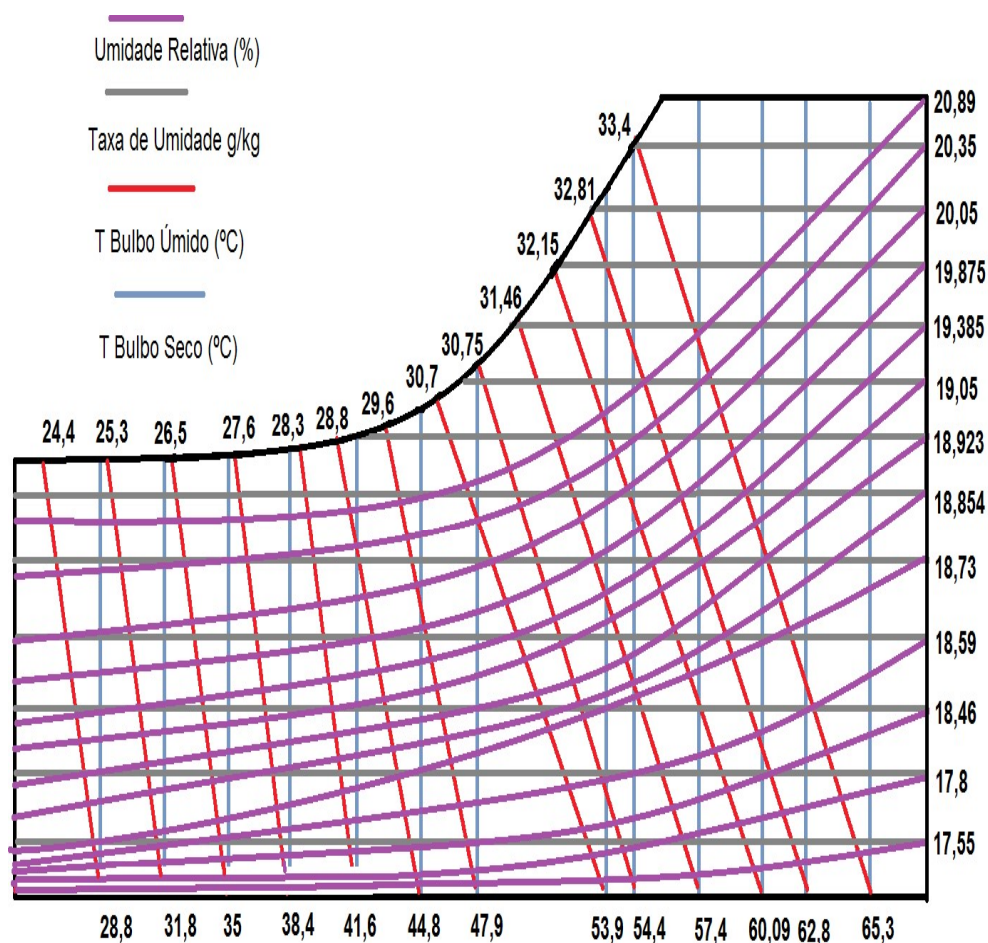
Com quaisquer duas propriedades psicométricas o site Flycarpet é capaz de determinar as demais propriedades, sendo assim, foi elaborada uma planilha com os dados experimentais e os que foram obtidos a partir destes e foram traçadas as linhas horizontais, verticais e transversais que culminaram na carta psicométrica apresentada na figura 23.

Tabela 2: Dados referência para elaboração da carta psicométrica.

Umidade Relativa (%)	T Bulbo Seco (°C)	Taxa Umidade (g/kg)	T Bulbo Úmido(°C)	T Orvalho(°C)
69,90000153	28,79999924	17,549	24,39	22,76
59,70000076	31,79999924	17,806	25,316	22,992
51,70000076	35	18,463	26,486	23,576
44,29999924	38,40000153	18,59	27,62	24,095
37,20000076	41,59999847	18,73	28,301	24,027
31	44,79999924	18,854	28,848	23,768
26,79999924	47,90000153	18,923	29,634	23,972
19,60000038	53,90000153	19,05	30,709	23,69
19	54,40000153	19,385	30,746	23,574
16,70000076	57,40000153	19,875	31,465	23,804
15	60,09999847	20,05	32,15	24,115
13,5	62,79999924	20,35	32,817	24,421
12,19999981	65,30000305	20,89	33,37	24,61
T Saturação (°C)	Entalpia (kJ/kg)	P Vapor (Pa)	P Vapor Sat. (Pa)	Calor Específico (kJ/kg . K)
24,345	73,772	2780	3962	1,029
25,249	77,54	2820	4705	1,03
26,399	82,547	2921	5628	1,031
27,511	87,633	3014	6776	1,033
28,167	90,757	3002	8037	1,033
28,689	93,303	2955	9495	1,034
29,453	97,142	2992	11119	1,035
30,483	102,53	2941	14948	1,037
30,515	102,703	2921	15312	1,037
31,214	106,509	2961	17663	1,038
31,883	110,267	3017	20036	1,039
32,533	114,03	3073	22675	1,04
33,071	117,23	3108	25377	1,041

Fonte: Elaboração Própria

Figura 23: Carta Psicométrica do secador rotativo protótipo.



Carta Psicométrica Secador Rotativo Protótipo

Fonte: Elaboração Própria.

Cada eixo representa uma das propriedades ilustradas na tabela, o sentido e a forma do gráfico são condizentes com a literatura. Esta carta é então, adequada para que qualquer usuário do secador possa, utilizando a mesma e em posse de dados básicos acerca das condições de operação, obter as demais propriedades do processo de secagem, permitindo por meio disto um grande avanço na caracterização do equipamento

Além de ser um importante resultado para embasamento científico de futuras pesquisas sobre o processo de secagem, uma vez que os secadores industriais normalmente não disponibilizam este tipo de informação.

4.3.3 Software

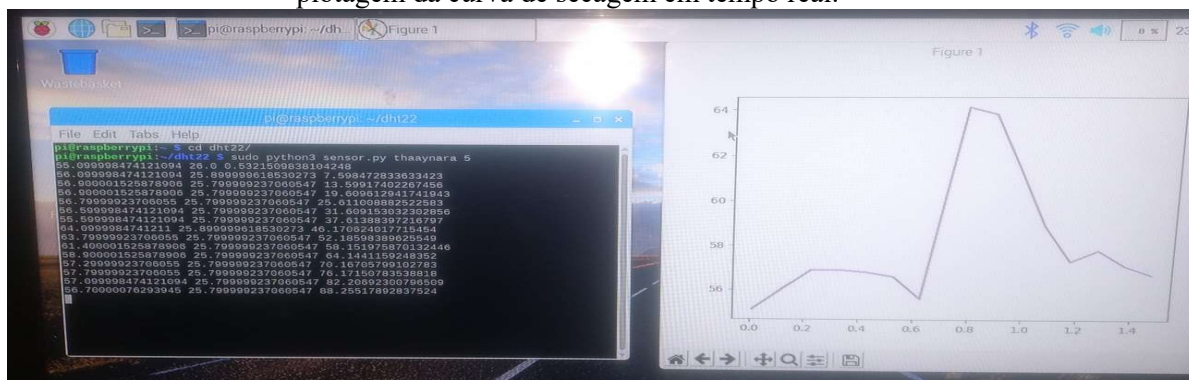
O script elaborado em linguagem de programação *Python* para integrar o sensor de umidade e temperatura DHT22 e o microprocessador *Raspberry* PI permite armazenar os dados relativos a cada processo de secagem, com medições periódicas em um intervalo de tempo escolhido pelo usuário, além de apresentar estes dados em tempo real a cada nova medição.

Figura 24: Script elaborado.

```
1 import signal
2 import sys
3 import time
4
5 import Adafruit_DHT
6 import matplotlib.pyplot as plt
7
8 PIN = 4
9 INTERVAL = int(sys.argv[2])
10
11 humidities = []
12 cts = []
13
14 def handler(signum, frame):
15     plt.plot(cts, humidities)
16     plt.savefig(sys.argv[1] + '.png')
17     plt.show()
18     sys.exit(0)
19
20 signal.signal(signal.SIGINT, handler)
21
22 with open(sys.argv[1] + '.csv', 'a') as f:
23     print('Humidity\tTemperature\tTime')
24
25     start = time.time()
26     while True:
27         humidity, temperature = Adafruit_DHT.read_retry(Adafruit_DHT.AM2302,
28                                                         PIN)
29
30         current_time = (time.time() - start)
31
32         if humidity is not None and temperature is not None:
33             values = [str(v) for v in [humidity, temperature, current_time]]
34             humidities.append(humidity)
35             cts.append(current_time)
36
37             print('\t'.join(values))
38             f.write(','.join(values) + '\n')
39             plt.plot(cts, humidities)
40             plt.pause(0.05)
41         else:
42             print('Cannot read in {}'.format(current_time))
43
44         time.sleep(INTERVAL)
45
```

Fonte: Elaboração Própria.

Figura 25: Resultado ilustrativo do funcionamento do script com armazenamento do dados e plotagem da curva de secagem em tempo real.



Fonte: Elaboração Própria

Os dados são armazenados em três variáveis: temperatura (°C), umidade relativa (%) e tempo (s), o que permite que com acesso ao banco de dados seja possível acompanhar e comparar as mais diversas operações de secagem, além disto o gráfico de Umidade Relativa vs Tempo também é salvo ao final do processo.

A utilização deste script é extremamente importante pois permite ao usuário por meio da verificação da curva de secagem verificar o momento de encerrar a operação, quando a umidade relativa atingida for de acordo com a normativa para o grão utilizado. Além de permitir observar se há alguma divergência do resultado esperado durante o processo de secagem e não apenas após a conclusão do mesmo, por meio deste mapeamento antecipado pode-se evitar prejuízos aos grãos e desperdício de tempo e recursos financeiros com a operação de secagem caso ocorra algo fora dos conformes.

4.3.4 Manual de Instruções ao Usuário

Como uma das principais motivações da elaboração deste trabalho é tornar o processo de secagem acessível a pequenos e médios produtores da região elaborou-se um manual que acompanhará o equipamento, onde são descritos os procedimentos básicos para a utilização e acompanhamento do processo por estes operadores de forma mais simples possível, para atender até mesmo o público mais leigo.

Manual do Usuário

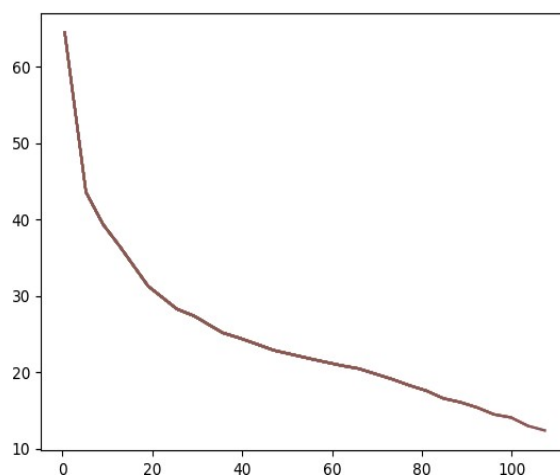


Instruções Básicas de Utilizador do Secador Protótipo

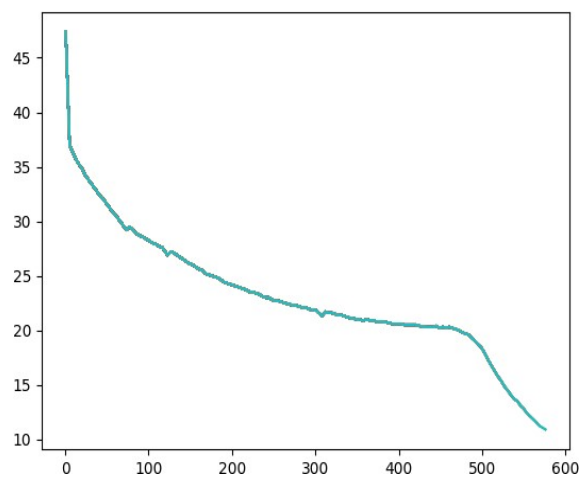
1. Antes de iniciar a operação sempre verifique se o tambor está vazio e limpo.
2. Insira os grãos pela abertura lateral do tambor utilizando um funil.
3. Ligue o secador e o motor em uma fonte de tensão de 220 V.
4. Aguarde 10 segundos para que a rotação do motor e o fluxo de ar do secador se estabilizem antes de iniciar as medições de umidade e temperatura.
5. Conecte a *Raspberry* em uma fonte de alimentação de 5 V e 2,5 A e em um monitor e aguarde a inicialização da mesma.
6. Abra o arquivo “sensor.py” presente na área de trabalho da raspberry e digite respectivamente o nome do arquivo que armazenará os dados de secagem e o intervalo de tempo desejado entre as medições – recomenda-se intervalos de 5- 10 s.
7. Acompanhe a curva de secagem mostrada na tela e se atente a quaisquer grandes incompatibilidades com as curvas de secagem padrão mostradas em anexo.
8. Em caso de grandes incompatibilidades como aumento excessivo de temperatura ou padrão diferente no decréscimo de umidade interrompa a operação e verifique se não há alguma alteração no equipamento.
9. Interrompa a operação quando observar que os valores de umidade relativa de 13% para o milho e 11% café foram atingidos.
10. Ao final da operação retire os grãos e certifique-se que não ficaram resíduos nos suspensores internos.
11. Aguarde pelo menos 5 minutos entre operações.

Anexo

Curva de Secagem Padrão para o Milho



Curva de Secagem Padrão para o Café



Soluções para Erros Frequentes

1. Meu equipamento não liga.

Verifique se o cabo do secador e do motor está conectado a tomada, caso esteja, verifique se há energia chegando a tomada, se mesmo assim o equipamento não ligar é necessário verificar se não houve algum tipo de dano ao mesmo que possa ter ocasionado a queima dos equipamentos, neste caso, ligue para alguém da equipe de trabalho do equipamento, que este prontamente irá verificar.

2. Meu tambor não rotaciona.

Verifique se o eixo do motor está rotacionando.

- Caso o eixo do motor não esteja rotacionando, verifique se o mesmo está conectado a uma fonte de tensão em funcionamento.
- Caso o eixo do motor esteja rotacionando e mesmo assim o tambor não rotacionar, desligue o equipamento e reconecte a corrente de transmissão entre o eixo do motor e o tambor.

3. Não consigo realizar a leitura dos dados na *Raspberry*.

Verifique se o microprocessador está conectado a uma fonte de 5 V

e 3 A. Confira se os fios do equipamento estão conectados ao sensor.

Confira se os conectores foram ligados aos pinos Gpio corretos na *Raspberry*.

4. Minhas curvas de secagem apresentam valores de umidade inicial muito maiores que os comparativos do manual.

Reinicie as medições, provavelmente você iniciou antes do motor e secador se estabilizar.

5. Minhas curvas de secagem apresentam valores de umidade inicial muito menores que os comparativos do manual.

Verifique se o equipamento não está aquecido, caso esteja, aguarde 5 minutos para reiniciar a operação.

6. Minha curva de secagem apresenta um pico incomum.

Provavelmente um grão colidiu com o sensor de medição, aguarde a conclusão do processo, abra a planilha de dados e elimine o dado discrepante, abra o tambor e confira se o grão não ficou preso a estrutura que envolve o sensor.

7. Não consigo abrir o código para ver a curva de secagem.

Ligue e desligue a *Raspberry*, abra a pasta e confira se o arquivo se encontra no diretório e inicie novamente o programa, em caso de persistência entre em contato com o grupo de trabalho especializado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Verificou-se que em concordância com os objetivos iniciais, a construção do secador rotativo protótipo permite a sua utilização em aulas de fenômenos de transferência à alunos de Engenharia de Energia na FGA, assim como, permite adicionar valor agregado aos grãos de pequenos e médios produtores de grãos na Região Centro-Oeste.

Os ensaios realizados para a caracterização do secador rotativo protótipo se mostraram bem-sucedidos e permitiram observar diversos detalhes sobre as peculiaridades deste equipamento. A elaboração da carta psicométrica enriquece a interpretação dos perfis de umidade e temperatura na secagem pois, fornece informações sobre diversas características da biomassa que podem ser úteis ao operador através do *input* de apenas duas informações sobre o processo, que podem ser obtidas pela leitura do sensor instalado no equipamento. Além de ser uma grande contribuição para trabalhos nesta área de conhecimento, uma vez que a metodologia aqui descrita não é encontrada facilmente na literatura.

A elaboração da carta psicométrica enriquece esta caracterização pois, fornece informações sobre diversas características da biomassa que podem ser úteis ao operador através do *input* de apenas duas informações sobre o processo, que podem ser obtidas pela leitura do sensor instalado no equipamento. Além de ser uma grande contribuição para trabalhos nesta área de conhecimento, uma vez que a metodologia aqui descrita não é encontrada facilmente na literatura.

Os cálculos relativos à eficiência energética permitiram verificar a dinâmica de operação de um secador do ponto de vista de transferência de calor e massa, informações que enriqueceram o aprendizado sobre o funcionamento deste secador protótipo em específico e necessárias para comparar com os demais modelos comerciais, caso futuramente o mesmo opere desta forma.

A comparação das curvas de secagens dos grãos de café e milho permitiu chegar-se à conclusão que o equipamento é adequado para utilização com os mais diversos grãos, desde que sejam respeitadas as peculiaridades de faixa de umidade final demandada, que deve estar em concordância com as normas da ANVISA, não é necessário realizar qualquer adequação

no equipamento para operar com diferentes grãos, variando apenas o tempo de secagem imposto aos mesmos.

O manual de instruções do usuário permite que todas as informações técnicas realizadas na presente monografia sejam expostas de forma clara e objetiva aos operadores, tornando, portanto, a utilização deste equipamento possível para pessoas com qualquer nível de instrução, possibilitando a expansão da utilização da secagem artificial a mais produtores, cumprindo um dos objetivos primordiais deste trabalho.

Conclui-se, portanto, que o protótipo construído, adaptado, caracterizado e testado é plenamente capaz de atender aos objetivos propostos e está pronto para ser utilizado na secagem de grãos.

Como sugestão para próximos trabalho acerca deste tema lista-se as seguintes propostas:

- Estudo da microestrutura dos grãos que passaram pela secagem para verificar dormência e outros possíveis efeitos colaterais da secagem;
- Realização de caracterização termo fluída para determinação de número e ângulo dos suspensores utilizados;
- Realização de comparação do ponto de vista da eficiência energética do secador rotativo com outros tipos de secadores;
- Análise do funcionamento e eficiência do secador nos modos de operação de fluxo concorrente e contracorrente.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, L.S. **Desenvolvimento de um Secador Rotativo para Grãos de Sorgo.** Monografia (Graduação em Engenharia de Energia) – UNB, Brasília/DF, 2017.

BAKER, C. G. J. Cascading rotary dryers. In: MUJUMDAR, A. S. **Advances in Drying**, Hemisphere, New York, v. 2, 1983, p. 1 -70.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Centro-Oeste produz 42% da safra de grãos e é o principal pólo agrícola do País.** Disponível em <<http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2015/10/centro-oeste-produz-42-da-safra-de-graos-e-e-o-principal-polo-agricola-do-pais>> Acesso em Junho de 2018.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Centro Oeste lidera produção agrícola Brasileira.** Disponível em e <<http://www.agricultura.gov.br/noticias/centro-oeste-lidera-producao-agricola-brasileira>> Acesso em Junho de 2018.

CASTILLO, L. **Operaciones de contato aire agua** – Humidificación – Psicometria. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Lambayeque/Peru, 1992.

ÇENGEL, Y.; BOLES, M. **Termodinâmica.** 5 ed., São Paulo: Editora McGraw-Hill, 2006.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa:** Uma abordagem prática, 4 ed. Porto Alegre, RS: Editora McGrawHill, 2012.

CHUN, Y.N.; LIM, M.S.; YOSHIAWA, K. Development of a high-efficiency rotary dryer for sewage sludge. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, Springer, 2012.

EMBRAPA. **Princípios de Secagem de Alimentos.** EMBRAPA CERRADOS, 2010.

EMBRAPA. **Secagem de Grãos.** EMBRAPA TRIGO, 2001.

KEEY, R. B. **Drying Principles and Practice.** Press, Oxford, Inglaterra: Editora Pergamon Press 1972.

LISBOA, M. H. **Estudo de Secadores Rotatórios na Secagem de Fertilizantes.** Dissertação (Mestrado em Biocombustíveis) - UFU, Uberlândia/MG, 2005.

MILLER, C. O., SMITH, B. A., SCHUETTE, W. H. **Factor Influencing the operation of Rotary Dryers**, *Trans AIChE*, v. 38, p. 841, 1942.

MOYERS, C. G.; BALDWIN, G. W.. Psychrometry, Evaporative Cooling and Solids Drying. In: PERRY, R. H.; GREEN, D. W.. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 7 th ed. Nova York, Estados Unidos, 1999, p. 1-90.

NONHEBEL, M. A. G. & MOSS, A. A. H.. **Drying of Solids in the Chemical Industry**. Butterworths, Londres, Inglaterra, 1971, p. 300-310.

SILVA, M. *et al.* Modeling at fertilizer drying in a rotary dryer: parametric sensitivity analysis. **Brasilian Journal of Chemical Engineering**, p. 350-370, 2012.

SCHOFIELD, F. R.; GLIKIN, P. G. **Rotary coolers for granular fertilizer**, **Chemical and Process Engineering Resources**, p. 183, 1962.

SILVERIO, B.C. **Estudos fluidodinâmicos e de secagem de fertilizantes em secadores rotatórios concorrentes**. Dissertação (Mestrado em Biocombustíveis) - UFU, Uberlândia/MG, 2010.

TEIXEIRA, J.C.; HESPANHOL, A.N. A região Centro-Oeste no contexto das mudanças agrícolas ocorridas no período pós 1960. **Revista Eletrônica da Associação Geógrafos Brasileiros**, v.2, 2006